بررسی و تحلیل زاویه مخروط سرامیکی و ارائه یک رابطه تجربی برحسب سرعت برخورد پرتابه سرمخروطی

در اهداف سرامیک – فلز

مصطفى عليزاده وخداداد واحدى

دانشگاه جامع امام حسین^(ع) (تاریخ دریافت: ۲۲/۰۴/۱۲؛ تاریخ پذیرش: ۹۲/۰۹/۰۷)

چکیدہ

زرههای سرامیک- فلز یک نوع از زرههای مرکب بوده که خصوصیات مورد نیاز برای کارآیی بهتر یک زره را تأمین مینماید. بررسی دقیق پدیده نفوذ در اهداف سرامیک- فلز بهعلت ساختار متفاوت سرامیک و فلز بسیار پیچیده و دشوار است و از آنجایی که سرامیکها مواد تردی بوده، سازوکار شکست در آنها نسبت به فلزها متفاوت و پیچیدهتر میباشد. در اثر برخورد پرتابه به سرامیک، یک ترک مخروطی در ضخامت سرامیک گسترش مییابد که داشتن رابطه مناسب برای پیشبینی زاویه این ترک مخروطی در تحلیل روابط نفوذ در اهداف سرامیک- فلز بهویژه در پاسخ لایه پشتیبان (صفحه فلزی) به ضربه بسیار تأثیرگذار است. زاویه گسترش این ترک مخروطی به عوامل- متعددی از جمله جنس سرامیک، سرعت برخورد، نوع پرتابه و غیره بستگی خواهد داشت. با توجه به آزمایشهای گوناگون در پارامترهای یاد شده سرعت برخورد بیشترین اهمیت را دارا میباشد. در مقاله حاضر، اثر سرعت پرتابه با دماغه مخروطی بر زاویه تشکیل این مخروط به صورت تجربی بررسی شده و یک رابطه برحسب سرعت برای نیمزاویه مخروطی ارائه شده است. در انتها، با توجه به آزمایشهای گوناگون در پارامترهای یاد شده سرعت برخورد یک رابطه برحسب سرعت برای نیمزاویه مخروطی ارائه شده است. در انتها، با توجه به رابطه به دست آمده برای نیمزاویه مخروط سرامیک، مدل عیک رابطه برحسب سرعت برای نیمزاویه مخروطی ارائه شده است. در انتها، با توجه به رابطه به دست آمده برای نیمزاویه مخروط سرامیکی، مدل

واژههای کلیدی: نفوذ، ذره سرامیکی، ترک مخروطی، پرتابه مخروطی

Analytiacal and Numerical Investigation of Penetration of Conical Projectiles into FML Targets

M. Alizadeh and Kh. Vahedi Imam Hossein University (Received: 03 July, 2013; Accepted: 28 November, 2013)

ABSTRACT

In this paper, development af a new analytical model for expressing the penetration of conical projectiles into fiber metal laminates is presented. For this purpose, the Paul&Zaid theory i.e. an analytical model for calculating the residual velocity of projectile after perforation of metal and Wen theory i.e. an analytical model for calculating the residual velocity and ballistic limit of laminate of composite in impact, are combined. Then the result of this new analytical model is compared with numerical results and a good correlation has been observed, comparing the analytical model presented in this paper to the numerical results.

Keywords: Penetration, Composite Armor, Conoid Angle, Conical Projectile

۱- کارشناس ارشد
 ۲- دانشیار (نویسنده یاسخگو): khvahedi@ihu.ac.ir

فهرست علائم

D	قطر پرتابه
a _p	شعاع پرتابه
L	طول پرتابه
M_p	جرم پرتابه
$ ho_{ m l}$	چگالی صفحه جلویی
$ ho_2$	چگالی لایه پشتیبان
h_1	ضخامت صفحه جلويي
h_2	ضخامت لايه پشتيبان
V_p	سرعت بالستيك
ϵ_2	كرنش شكست ماده پشتيبان
σ_2	مقاومت نهايى كششى لايه پشتيبان
φ	نيمزاويه مخروط سراميكي

۱– مقدمه

سرامیکها بهعلت داشتن خواصی مانند دانسیته پایین، مقاومت فشاری بالا و مدول بالک و برشی بالا مدتهاست بهعنوان یکی از زرههای حفاظتی در سامانههای بالستیکی به کار میروند. در کاربردها، معمولاً زرههای سرامیکی با یک یا چند لایه پشتیبان تقویت می شوند. پشتیبان انرژی جنبشی باقی مانده پرتابه را بعد از شکست سرامیک جذب می کند و باعث پایداری سرامیک در طبی فرآيند نفوذ مي شود. هرچه ضخامت ورق يشتيبان بيشتر باشد شکست سرامیک در اثر تغییر شکل ورق پشتیبان کمتر خواهد بود. بعد از برخورد پرتابه به یک هدف سرامیکی با لایه پشتیبان فلزی، شکست مخروطی در اثر برگشت امواج کششی اتفاق میافتد، این مخروط سرامیکی، بار ناشی از برخورد پرتابه را به سطح وسيعتر يايه مخروط روى لايه يشتيبان منتقل مى كند. تحقیق و بررسی پدیده نفوذ در سرامیکها معمولاً به سه روش انجام می پذیرد: ۱- روشهای تجربی و نیمه تجربی، ۲- روشهای عددی و ۳- روشهای تحلیلی. تاکنون مدل های مختلفی اعم از مدلهای عددی، تجربی و تحلیلی در زمینه نفوذ در اهداف سرامیکی ارائه شده است [۱].

در روش عددی به حل کامل تمام معادلات حاکم بر نفوذ با استفاده از روشهای مختلف مانند تفاضل محدود، ^۱ SPH اجزا محدود در محیطهای پیوسته پرداخته میشود. روشهای عددی برای تحلیل مسائل مرکب و پیچیده مناسب است. اولین تحلیل

عددی قابل ملاحظه بر اهداف سرامیکی توسط ویلکینز^۲ و همکارانش انجام گردید [۲]. این تحلیل عددی با کد تفاضل محدود (HEMP) برای شبیهسازی برخورد در ضربات قائم انجام شده است. لی^۳ و همکارانش با استفاده از روشهای عددی، برخورد یک پرتابه فولادی را در یک زره سرامیکی سبک وزن بررسی کردهاند و همچنین به مطالعه پدیدههایی همانند فرسایش پرتابه، انتشار ترک، ساختار مخروط سرامیکی و شکست فلز لایه پشتیبان پرداختهاند [۳].

مدلهای تحلیلی بر پایه قوانین فیزیکی نسبتاً ساده بنا شدهاند و یکی از روشهای شبیهسازی پدیده نفوذ می باشند. از جمله مدلهای تحلیلی ارائه شده در زمینه نفوذ در اهداف سرامیکی می توان از مدل تحلیلی فلورانس^۴ که در سال ۱۹۶۹ ارائه گردیـد، نام برد [۴]. در مدل فلورانس از موازنه انرژی جنبشی پرتابه برخورد کننده به هدف با انـرژی جـذب شـده در لایـه یشـتیبان، مقدار سرعت حد بالستیک بهدست می آید. در سال ۱۹۹۰ مدل تحلیلی دیگری توسط وود وارد^۵ معرفی گردید [۵] که در این مدل فرآیند ضربه پرتابه در هـدف سـرامیک- آلومینیـوم مـورد بررسی قرار گرفت. در این مدل ویژگے،های اصلی شکست زره سرامیک- کامپوزیت (در این مدل بحث زاویه مخروط سرامیکی، تغییر شکل صفحات نازک و فرسایش⁷ پرتابه) با اثر توده شدن جرم^۷ ترکیب شده و یک مدل ساده را تولید نموده که محاسبه اهداف سرامیک- فلز با لایه پشتیبان نازک و ضخیم را امکان پذیر نمود. نتایج این مدل تحلیلی برای کالیبرهای کوچک معتبر می باشد و برای پرتابه با کالیبر متوسط نتایج آزمایشگاهی با مدل تحلیلی تطابق نداشته و مدل برای این حالت معتبر نمیباشد. در سال ۱۹۹۱ دن ریجر^ مدلی ارائـه داد كـه در آن بـه بررسـی فـاز فرسایش و قارچی شدن پرتابه و نیز مدلهای مختلف تغییر شکل فلز لایه پشتیبان پرداخته و همچنین معادلاتی برای رفتار سرامیک خـرد شـده ارائـه داده اسـت [۶]. در سـال ۱۹۹۸ مـدل تحليلي ديگري توسط زئيرا و سنجز - گالوز ارائه گرديد [۷]. اصل این مدل بر پایه معادله نفوذ درون سرامیک تیت و

- 2- Wilkins
- 3- Lee
- 4- Florence
- 5- Woodward
- 6- Erosion
- 7- Lumping Of Masses
- 8- Den Reijer
- 9- Zaera and Sanches-Galvez

¹⁻ Smoothed Particle Hydrodynamic

 $a = a_p + 2h_2$.
 (1)

 $| \mathcal{P}_{1} (1) + 2h_2 (1) +$

بسزایی خواهد داشت. همچنین رابطه (۳) اهمیت بالایی در پیش بینی سرعت حد بالستیک که در رابطه (۴) آمده، خواهد داشت و نشان دهنده تأثیر نیمزاویه در پیشبینی سرعت حد بالستیک است.

$$f(a) = \frac{m_p}{[M_p + (\rho_1 h_1 + \rho_2 h_2)\pi a^2]\pi a^2},$$
 (*)

$$V_{\rm p} = \sqrt{\frac{\varepsilon_2 \sigma_2 h_2}{.91 M_{\rm p} f(a)}},\tag{f}$$

که در آن، V_p سرعت حد بالستیک، $\epsilon_2 \mathcal{E}_2$ کرنش شکست لایه ρ_2 (UTS) پشتیبان، σ_2 مقاومت نهایی کششی لایه پشتیبان (UTS)، σ_2 چگالی چگالی لایه پشتیبان، h_2 ضخامت لایه پشتیبان، h_2 چگالی سرامیک، h_1 ضخامت سرامیک و M_p جرم پرتابه میباشد.



مخروط سراميكي.

۲-۲- مدل تحلیلی زئیرا – سنچز گالوز در این مدل، نیمزاویه مخروط سرامیکی ۶۵ درجه فرض شده است. شکل نیمزاویه مخروط سرامیکی و رابطه مومنتم خطی ترک مخروطی در شکل ۲ نشان داده شده است. در این مدل تحلیلی گشتاور خطی ترک مخروطی از رابطه (۵) بهدست میآید.

الكسيوكي بوده، ضمن اينكه مدل لايه فلزى از مدل وودوارد و دن ریجر اقتباس شده است. در این مدل مقادیر سرعت شعاعی، جرم شعاعی و سرعت حد بالستیک برای پرتابه های با کالیبر متوسط و کوچک با مقادیر آزمایشگاهی تطابق دارد. در این مدل، قارچی شدن نوک پرتابه درنظر گرفته نشده و فقط فرسایش در حین نفوذ در محاسبات درنظر گرفته شده است. در سال ۲۰۱۰ مدلی دیگر توسط فعلی ارائه گردید [۸] که اساس آن بر پایه مدل زئیرا و سنچز- گالوز میباشد، که در آن مدل تحلیلی برای نفوذ پرتابههای تغییر شکل پذیر درون اهداف سرامیک- فلز توسعه داده شده است. در این مدل در شرح تغییر شکل نوک پرتابه، معادله مومنتم محوری در امتداد محور مرکزی پرتابه و هدف انتگرال گیری شده است. برای مدلسازی رفتاری مخروط سرامیکی از معادله گشتاور خطی استفاده و برای مدلسازی تغییر شکل لایه فلزی رفتار کارسختی مواد صلب درنظر گرفته شده است. همچنین از تعادل معادله انرژی نیز استفاده شده و با تقسیم فرآیند نفوذ به چند مرحله، در هر مرحله معادلات مربوط استخراج شده است.

در مدل های تجربی با استفاده از داده های آزمایشی معادله های جبری حاکم بر آنها استخراج و سپس پارامتر های مدنظر پیش بینی می شوند. مدل های تجربی متعددی ارائه شده که از آن میان می توان به آزمایش های بلس^۲ و همکارانش [۹]، میسلز^۳و همکارانش [۱۰] در زمینه نفوذ در اهداف سرامیکی اشاره نمود.

۲ – تأثیرات نیمزاویه مخروط سرامیکی در مدلهای تحلیلی زاویه مخروط سرامیکی میتواند تأثیر بسزایی در جواب نهایی مدلهای تحلیلی نفوذ در اهداف سرامیک – فلز داشته باشد. در ادامه تأثیرات زاویه مخروط سرامیکی بر چند مدل تحلیلی مهم، مورد بررسی قرار گرفته است.

۲-۱- مدل تحليلي فلورانس

این مدل که اولین مدل تحلیلی ارائه شده در اهداف سرامیک – فلز میباشد، زاویه مخروط سرامیکی ثابت و برابر با ۶۳ درجه فرض شده است. در این مدل، زاویه تأثیر خود را در جرم مؤثر نشان میدهد. با توجه به شکل **۱** که بیانگر برخورد پرتابه با هدف میباشد، رابطه زیر را میتوان نوشت:

¹⁰⁻Tate and Alekseevskii

²⁻Bless

³⁻ Mayseless



در این مدل، نیمزاویه مخروط سرامیکی بر اساس آزمایشهای ويلسون- هترينگتون^۲ [۱۲] تعيين شده است. بر اساس اين آزمایشها نیمزاویه مخروط سرامیکی بین مقادیر ۳۰-۲۰ درجه تغییر میکند. وقتی سرعت کمتر از ۳۵۰ m/s باشد نیمزاویه برابر با ۳۰ درجه و زمانی که سرعت برخورد بیشتر از ۱۰۰۰ m/s باشد نیمزاویه مخروط برابر با ۲۰ درجه می باشد. روابط مورد استفاده در این مدل همان روابط مدل زئیرا بوده که در روابط (۸– ۵) به آنها اشاره گردید.

بهنظر میرسد علت اختلاف زاویه مخروط سرامیکی در این مدلها، تفاوت در نوع پرتابه و هدف می باشد. به عبارت دیگر نوع دماغه پرتابه، پرتابه بلند و کوتاه، نوع هدف از منظر ضخامت (هدف نازک، متوسط و نیمه بینهایت) پارامترهای مهم در اختلاف در زاویه مخروط سرامیکی در این مدلها باشد. بهعنوان مثال، همان طور کے اشارہ گردید، رابطے نیمزاویے فلوز برای سرامیک با ضخامت متوسط و لایه پشتیبان نیمه بینهایت و یرتابه سرتخت می باشد، در حالی که در موارد دیگر که این نیمزاویه را پیشبینی نمودهاند، ضخامت سرامیک و لایه پشتیبان و هندسه پرتابه متفاوت بوده است. رابطه ارائه شده توسط فلوز با افزایش سرعت برخورد، نیمزاویه مخروطی افزایش یافته تا اینکه در مقدار ۶۸ درجه ثابت گردد، اما در رابطه ارائه شده توسط ویلسون- هترینگتون با افزایش سرعت برخورد، نیمزاویه مخروطی کاهش یافته تا اینکه در مقدار ۲۰ درجه ثابت گردد.

نیمزاویه مخروطی به پارامترهای مختلفی از قبیل ضخامت سرامیک، ضخامت لایه پشتیبان، قطر پرتابه، دماغه پرتابه، طول پرتابه و سرعت پرتابه بستگی خواهد داشت. ولی از آنجایی که بیشترین تحقیقات صورت گرفته دال بر این مطلب میباشد که در پارامترهای یاد شده سرعت برخورد بیشترین اهمیت را داراست، بنابراین در این مقاله بررسی و نقـش سـرعت برخـورد پرتابـه بـر نیمزاویه مخروطی مورد بحث و بررسی قرار گرفته است. به همین منظور یک هدف ثابت و پرتابه سرمخروطی که در واقعیت کاربرد بیشتری دارد برای انجام این آزمایشات در نظر گرفته شد.



۲-۳- مدا ر در مدل تحلیلی فلوز ([۱۱] یک رابطـه تحلیلـی بـرای نـیمزاویـه مخروط سرامیکی برای پرتابههای میله بلند استوانهای (سرتخت) در اهداف با لايه يشتيبان نيمه بينهايت ارائه شده است. رابطه (٩) بيان كننده رابطه نيمزاويه مخروط سراميكي برحسب سرعت برخورد در بازه سرعت m/s ۲۲۰۰-۲۲۰ می باشد. در این رابطه نیمزاویه از ۳۴درجه (سرعت ۲۲۰ m/s) تا ۶۸ درجه (سرعت m/s) ۱۰۰۰) تغییر می کند. در سرعتهای بالاتر از ۱۰۰۰ فرض بر این است که زاویه برابر با ۶۸ درجه خواهد شد. در این رابطـه ∪U سرعت برخورد میباشد:

با توجه به روابط ذکر شده، ارائه صحیح از نیمزاویه مخروط

سرامیکی تأثیر بسزایی در حل مسئله (پاسخ فلـز) و سـرانجام در

جواب نهایی هدف فلز – سرامیک خواهد داشت.

 $P_{C} = \pi \rho_{C} h_{ct} \left[U \left(\frac{D_{eq}^{2}}{16} + \frac{R_{ct}^{2}}{12} + \frac{D_{eq} R_{ct}}{12} \right) + \right]$

 $W\left(\frac{D_{eq}^2}{48} + \frac{R_{ct}^2}{4} + \frac{D_{eq}R_{ct}}{12}\right).$

www.SID.ir

(Y)

(λ)

²⁻ Wilson -Hetherington

¹⁻ Fellows

۳- مراحل ساخت و مشخصات فیزیکی هدف و پرتابه در این کار تحقیقی از فلـز آلومینیوم ۲۶-۶۰۶۱ بـهعنـوان لایـه پشتیبان و سرامیک از جنس آلومینا ٪۹۹ استفاده شده است.

۳-۱- خواص مکانیکی هدف

سرامیک آلومینا با توجه به خواص بسیار بالای بالستیکی و دسترسی آسان و فراوانی مورد استفاده قرار گرفته است. خواص سرامیک آلومینا مورد استفاده در آزمایشهای جدول ۱ ارائه شده است. ابعاد سرامیک مورد استفاده در این آزم ایش ۵۰×۵۰ میلیمتر و ضخامت ۱۰ میلیمتر میباشد.

جدول (۱): خواص سرامیک مورد استفاده در آزمایش.

سراميک آلومينا						
مقدار	واحد	پارامتر				
7.99		خلوص				
١.	μm	دانەبندى				
۳۸۰۰-۳۸۵۰	$\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$	چگالی				
٨٣	HRa	سختى				
۳۵.	MPa	استحکام خمشی ۳ نقطهای				

از فلز آلومینیوم ۲۶-۶۰۶۱ با توجه به خواص: ۱- چگالی پایین،۲- سے ختی مناسب، ۳- خاصیت جوشکاری خوب و ۴- خواص انتقال امواج به عنوان لایه پشتیبان سرامیک استفاده شده است. باید اشاره نمود این آلیاژ یکی کاربردیترین آلیاژهای مورد استفاده در صنایع نظامی و هوایی می باشد. مشخصات مكانيكي فلز آلومينيوم ۲۶-۶۰۶۱ با توجه به آزمايش هاى انجام گرفته در جدول ۲ نشان داده شده است. ابعاد آلومینیوم مورد استفاده در آزمایش ۲۰×۷۰ میلیمتر و به ضخامت ۶ میلیمتر می باشد. در ساخت اهداف سرامیک - فلز سه مرحله صورت گرفته است که عبارتند از: ۱- اتصال اولیه سرامیک با فلز، ۲- قالب گیری مناسب توسط رزین و ۳- ماشینکاری هدف برای همگن نمودن ابعاد آن. هدف از قالب گیری اهداف بهوسیله رزین جلوگیری از متلاشی شدن سرامیک خرد شده پس از اصابت پرتابه است. بـرای قالب گیری و پرسازی فضای بین صفحه بالای آلومینیوم تا صفحه بالای سرامیک از رزین SR۱۷۰۰ و هاردنر SD۲۷۰۵ استفاده شده است. برای آنکه نیروی تکیه گاهی به صورت عمودی بر هـدف اعمال گردد، پس از قالب گیری مناسب توسط رزین، عملیات

www.SID.ir

Archive of SID

ماشین کاری روی اهداف صورت گرفته است. شکل ۳ – الف اتصال اولیه سرامیک با فلز و شکل ۳ – ب، هدف نهایی و آماده آزمایش را نشان دمیدهد.

جدول (۲): خواص مكانيكي ۲۶-۶۰۶۱.

	چگالی	سختی HB مدول حگالی	سختی HB	استحكام	درصد ازدیاد طول
ی ہمپر /kg	kg/m ³	یانگ GPa	قطر	کششی MPa	ضخامت
			ساچمه	WII u	نمونه
				۱۰mm	
T6	۲۷۰۰	۶٨٫٣	1.1	۲۳۱	۱۳



(الف)



(ب) **شکل (۳):** الف) اتصال اولیه سرامیک با فلز و ب) هدف نهایی و آماده آزمون.

۲-۲- خواص مکانیکی پر تابه

پرتابههای ضد زره معمولاً از کاربید تنگستن و یا فولادهای با سختی بالا ساخته می شوند. جنس پرتابه به کارگیری شده در آزمایش های فولاد ۱/۲۵۱۰ بوده، که از دلایل استفاده از این آلیاژ می توان به قابلیت سخت کاری و تنش تسلیم بالای آن اشاره نمود. خواص مکانیکی این فولاد پس از سخت کاری در جدول ۳ آورده

شده است. همچنین یک پرتابه با سابوت همراه با مشخصات هندسی در شکل ۴ نشان داده شده است.

جدول (۳): خواص فولاد آلیاژی پرتابه مورد استفاده در آزمایش.

فولاد ۱/۲۵۱۰						
مقدار	واحد	پارامتر				
۷۸۰۰	$\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$	چگالی				
882	HRc	سختى				
۳۵۰	MPa	استحکام خمشی ۳ نقطهای				
714	GPa	مدول يانگ				
۵۲۰	MPa	تنش تسليم				



شکل (۴): ابعاد هندسی پرتابه و یک نمونه پرتابه همراه با سابوت مورد استفاده در آزمایش.

۳–۳– دستگاه شلیک پرتابه

L=۲۵/۴ mm

در آزمونهای انجام شده، یس از شلیک پرتابه توسط دستگاه تفنگ گازی (شکل۵)، سرعت پرتابه قبل از برخورد توسط سامانه لیزری اندازهگیری شده است.



¹⁻ Sabot

نمونهها در داخل قالب نگهدارنده دستگاه تفنگ گازی با اعمال گشتاور یکسان در پیچها، شرایط مرزی کاملاً گیردار در لبههای هدف ایجاد مینماید.

۴-بحث و نتایج آزمایشها

انجام آزمایشها، مشاهدات و اندازه گیریهای صورت گرفته، حاکی از این مطلب است که یک مخروط سرامیکی دو مرحلهای ایجاد شده است که شاید علت ایجاد این مخروط دو مرحله ای، نوع دماغه پرتابه باشد. شکل ۶ یک قطعه سرامیک خرده شده از یک هدف پس از اصابت گلوله را نشان میدهد. در این مخروط دومرحلهای بهوضوح دیده می شود که زاویه مخروط اولیه (θ_1) متغیر بوده ولی زاویه مخروط ثانویه (θ_2) را تقریباً میتوان ثابت درنظر گرفت.



شکل (۶): یک قطعه سرامیک خرده شده از هدف.

در شکل ۷ مخروط سرامیکی دو مرحلهای به صورت شماتیک نشان داده شده است.



شکل (۷): شماتیک مخروط سرامیک دومر حلهای از اصابت پرتابه سرمخروطی.

۴-۱- روند اندازه گیری زاویه مخروط سرامیکی

برای اندازه گیری زاویه های θ_1 و θ_2 و ارتفاع h برای هر هدف، ابتدا سرامیکهای جانبی که تقریباً سالم ماندهاند، جداسازی شده و پس از شماره گذاری هر قطعه که در تصویر سمت راست شکل $A - \mathbf{y}$ نشان داده شده است، توسط تجهیزات خاص زوایای اندازه گیری می شود. $\theta_2 = \theta_1$

²⁻ Gas Gun



(الف)



شکل (۸): تصویر a: قبل از جداسازی رزین و تصویر b: بعد از جداسازی رزین و شمار گذاری برای آزمایش با سرعت برخورد ۲۷۹/۷۲۰ m/s.

جدول ۴ نمونهای از اندازه گیریهای انجام شده برای یک آزمایش را نشان میدهدکه در آن، سرعت برخورد پرتابه ۲۷۹٬۷۲۰ است البته باید اشاره نمود با توجه به شکست غیرمتقارن سرامیک و فرآیند پیچیده رشد ترک، در بعضی از قطعات خرد شده سرامیک اندازه گیری زوایا امکانپذیر نبوده است.

جدول (۴): مقادیر θ_1 ، θ_2 و h برای آزمایش با سرعت برخورد ۲۷۹/۷۲۰ m/s.

شماره اندازه <i>گ</i> یری	شمارہ قطعہ	θ_1	θ_2	h(mm)		
١	١	9 9	-	-		
٢	٢	۵۶/۵	۷۵	۶/۳۷		
٣	٣	۶۵	۷۲	۵/۰۲		
۴	٨	۶۵	٧۴	۵/۷۵		
۵	٩	۶۳/۵	٧۴	٧/١۵		
۶	١.	۵۷	۶٩	-		

در آزمایش های با سرعت بالای پرتابه، قطعه سرامیکی به قطعات بسیار ریز تبدیل شده و پودر می شود که در چنین حالتی اندازه گیری زوایا را غیرممکن می نماید. با میانگین گرفتن از زوایای $heta_1$ و $heta_2$ و ارتفاع h یک مقدار مشخص برای هر سرعت برخورد به دست آمده است.

جدول **۵** نیز مقادیر میانگین زوایای ₁ و ₂ و ارتفاع h را برای برخی از آزمایشها نشان میدهد.

شماره آزمایش	V _I (m/s)	$ heta_{ m l}$ (درجه)	θ2 (درجه)	h(mm)
١	797	8 • 18	۷۲	۵/۳
٢	۲۸۰	87/7	۷۲/۲	۶/۱۶
٣	۳۸۳	54/54	-	۵/۶۲
۴	۳۹۱	۶۲/۳	۷۳/۴	۵/۱۲
۵	۵۶۶	44	V7/V	4/21

جدول (۵): میانگین مقادیر ،0₁ ، 6₂ و h برای برخی از آزمایش، ا

با توجه به مقادیر بهدست آمده می توان θ_2 را ثابت و برابر با مقدار ۷۲/۵ درجه در نظر گرفت و از روش برازش منحنی، نیم زاویه مخروط سرامیکی را برای θ_1 بهدست آورد. از سه روش برازش منحنی خطی کمترین مربعات، سهمی کمترین مربعات و نمایی رابطه نیم زاویه مخروط سرامیکی θ_1 بهدست آمده که به ترتیب در روابط (۱۰-۱۱) آمده است.

- $\theta_1 = -.0564 V_{\rm I} + 80.0320, \tag{(1)}$
- $\theta_1 = -.0004V_I^2 + .306V_I + 10.307, \tag{11}$
- $\theta_1 = 87.56 e^{-.0011 V_{\rm I}}.$ (17)

در شکل **۹** سه رابطه خطی، سهمی و نمایی رسم شده است. همان طور که از شکل پیداست روابط خطی و نمایی تا محدوده سرعت ۷۵۰m/s همپوشانی داشته و مقادیر یکسانی برای نیمزاویه مخروط سرامیکی ارائه میدهند و در سرعتهای بالاتر از ۷۵۰ m/s ایم ۷۵۰ با افزایش سرعت، اختلاف در پیش بینی نیمزاویه مخروط سرامیکی رو به افزایش خواهد گذاشت. برازش سهمی با توجه به اینکه در سرعتهای بالاتر از ۷۵۰ m/s نیمزاویه مخروطی را منفی پیش بینی مینماید، برازش مناسبی برای نیمزاویه مخروط سرامیکی نمی باشد.





۴-۲- بحث در مورد نیمزاویه های مخروطی بهدست آمده

از برازش منحنی

با توجه به نتایج بهدست آمده از آزمایشها در سرعتهای پایین تر از سرعت حد بالستیک برای پرتابه سر مخروطی، ترک مخروطی دو مرحلهای ایجاد می گردد و با افزایش سرعت این ترک دو مرحلهای تبدیل به یک ترک یک پارچه مخروطی می شود. شکل مرحلهای تبدیل به یک ترک یک پارچه مخروطی می شود. شکل ۱۰ بیانگر این تغییرات می باشد. با توجه به نتایج بهدست آمده از این آزمایش، در ترک مخروطی دو مرحلهای، θ_1 متغیر و θ_2 تقریباً ثابت و برابر ۲۲/۵ درجه می باشد.



شکل (۱۰): تغییرات زاویه مخروط سرامیکی در اثر افزایش سرعت برخورد پرتابه.

در بررسی تغییرات نیمزاویه مخروط سرامیکی می توان ۲ فرض اولیه نمود که عبارتند از: ۱- نیمزاویه برای سرعتهای بالاتر از ۱۰۰۰ m/s ثابت و برابر با مقدار بهدست آمده در سرعت قرار گرفته است و ۲- برای سرعتهای حد بالستیک این نیمزاویه برابر با صفر می شود یعنی از یک مقدار خاص، نیمزاویه با افزایش www.SID.ir

سرعت برخورد کاهش یافته تا اینکه در چند برابر سرعت حد بالستیک به صفر میل نماید (این فرض با توجه به انرژی جنبشی بسیار بالای پرتابه در سرعتهای چندین برابر سرعت حد بالستیک و پیچیدگی رفتار رشد ترک و شکست در سرامیک، توسط نگارنده در نظر گرفته شده است). حال با توجه به فرضیات مطرح گردیده، برای انتخاب بهترین رابطه برای پیش بینی نیمزاویه مخروطی باید یک فرض به عنوان مبنا انتخاب گردد. اگر فرض (۱) مبنای انتخاب بهترین نیمزاویه باشد، رابطه ی خطی بهترین رابطه می باشد. در این رابطه نیمزاویه در سرعت الارد. برابر با ۸۸/۸ درجه و در سرعت الامه، بهترین رابطه پیش بینی می باشد حال اگر مبنا فرض (۲) باشد، بهترین رابطه پیش بینی می باشد حال اگر مبنا فرض (۲) باشد، بهترین رابطه پیش بینی الامه نیمزاویه مخروط سرامیکی، رابطه نمایی می باشد. در این رابطه نیمزاویه در سرعت الار با ۲۰۰ درجه و با

۴-۳- بهینهسازی مدل فلورانس با اســتفاده از نــیمزاویــه مخروط سرامیکی تجربی

در مدل فلورانس از موازنه انرژی جنبشی پرتابه برخورد کننده به هدف با انرژی جذب شده در لایه پشتیبان، مقدار سرعت حد بالستیک بهدست میآید. رابطه حد بالستیکی که فلورانس ارائه داد، در رابطه (۴) آورده شده است این رابطه که برای پرتابههای سرتخت و اهداف متوسط است، وابسته به رابطه جرم مؤثر بوده که رابطه جرم مؤثر خود نیز، تابعی از نیمزاویه مخروطی میباشد. همان طور که بیان گردید، در سرعتهای یایین، یک ترک

مخروط دومرحلهای ایجاد می گردد و با افزایش سرعت، این مخروط به یک مخروط یک پارچه تبدیل می شود. برای ۱٬۲GPa استفاده شده است. هدف متشکل ازسرامیک در جلو و آلومینیوم بهعنوان لایه پشتیبان در پشت سرامیک می،اشد. در این آزمایش، سرامیک از جنس B₄C با چگالی ۲۴۸۰ و مقاومت فشاری ۱۳٬۳۷ GPa می،اشد. جنس لایه پشتیبان از آلومینیوم T6-606 با چگالی ۲۷۴۰، مقاومت کششی نهایی آلومینیوم ۲۵-606 با چگالی ۲۷۴۰، مقاومت کششی نهایی شکست ۸۱۰MPa و کرنش

۴-۴- مقایسه نتایج مدل تحلیلی بهینهشده با دیگر مدلهای تحلیلی

از مدلهای تحلیلی مهم که پیش بینی مناسبی از فرآیندهای نفوذ (بهویژه سرعت حد بالستیک) در اهداف نازک و متوسط سرامیک – فلز دارند، می توان به مدلهای وودوارد، زئیرا و فعلی اشاره نمود. در جدول ۶ نتایج حاصل از مدلهای تحلیلی و مدل بهینه شده در پیش بینی سرعت حد بالستیک مورد مقایسه قرار گرفته است. بهینه سازی مدل تحلیلی فلورانس با توجه به اینکه این رابطه سرعت حد بالستیک را پیش بینی می کند و مقدار سرعت برخورد پرتابه با لا می باشد و همچنین از نیم زاویه مخروط سرامیکی برای تعیین مقدار جرم مؤثر استفاده می گردد و با توجه به نتایج تجربی به دست آمده، مقدار نیم زاویه مخروط سرامیکی ۲۲/۵ در رابطه به دست آمده، مقدار نیم زاویه مخروطی سرامیکی ۲۲/۵ در رابطه (۲) و از رابطه خطی نیم زاویه مخروطی، برای بهینه نمودن این مدل تحلیلی برای پرتابه های سرمخروطی مورد استفاده قرار گرفته است. حال برای صحه گذاری مدل بهینه سازی شده فلورانس، از نتایج تجربی ویلکینز [۱۳] که در آن ضخامت هدف و هندسه پرتابه نزدیک به نتایج تجربی انجام شده در این تحقیق می باشد، استفاده گردیده است.

مشخصات پرتابه و هدف آزمایش ویلکینز: در این آزمایش از پرتابه فولادی ۱ به سختی ۵۶–۵۴ راکول سی با زاویه مخروطی ۵۵ درجه به طول یک اینچ (۲۵٫۴ میلیمتر) و به قطر ۰/۳ اینچ(۷٫۶۲ میلیمتر) و به وزن ۸٫۱۳ گرم و مقاومت دینامیکی

ضخامت لايه	ضخامت	$(m/_S)$ سرعت حد بالستیک					
پشتيبان(6061-T6) (mm)	سرامیک (B ₄ C) (mm)	فعلى	زئيرا	وودوارد	تجربی [۱۲]	فلورانس	فلورانس بهينه شده
	۵٫۵	% 8.	44.	47.	۵۸۰	۲۷۰,۹۱	۵۱۳/۱۱
۵/۰۸	۶٫٣	۶۸۰	۵۰۰	۵۰۰	۶۴۰	441,VF	۶۵۰,۸۸
	۷	٧٠٠	۵۵۰	۵۸۰		۳۹۲,۱۸	VX9,77
۶٬۳۵	۵٫۵	880	۵۱۰	۵۵۰	۶۳۰	818	F•T/9T
	۶,٣	۷۱۰	۵۵۰	۶۲۰		۳۸۷٬۶۳	४ ९٣,९४
	۷	۷۸۰	۶۱۰	۷۴۰	۸۳۰	401/4	98D/+V
٧,٢۴	۵٫۵	۷۵۰	54.	۶۱۵	۷۳۰	٣۴۶ _/ ۸۸	884 _/ N •
	۶,٣	٧۶٠	۶۷۵	٧٠٠	۸۳۰	FTF,9T	٨٤١٬٨٤
	۷	٧٧٠	۷۲۰	۸۳۰		۵۰۲٬۰۹	۱۰۱۸/۵

جدول (۶): سرعت حد بالستیک برای سرامیک (B₄C) ولایه پشتیبان (TF- ۶۰۶۱) در ضخامتهای مختلف.

در شکل **۱۱** سرعت حد بالستیک مـدلهـای تحلیلـی وودوارد، زئیرا، فعلی و فلورانس بهینه شده برای ضخامت ۶٫۳ mm سرامیک مورد قیاس قرار گرفته است.

در شکل **۱۲** سرعت حد بالستیک مدلهای تحلیلی وودوارد، زئیرا، فعلی و فلورانس بهینه شده برای ضخامت ۵٬۰۸ mm لایه پشتیبان مقایسه شده است



شکل (۱۱): مقایسه سرعت حد بالستیک مدلهای تحلیلی برای ضخامت ۶٫۳ mm سرامیک.



ضخامت ۶٬۳ mm لایه پشتیبان.

نتایج بهدست آمده از مدل بهینه شده دارای خطای کمتر از ۱۲٪ بوده که نسبت به دیگر مدل های تحلیلی از دقت مناسبی برخوردار است. در بیشتر حالت های آمده در جدول ۶۰ خطای مدل بهینه شده کمتر از سایر مدل ها میباشد که این خود مؤید این موضوع است که رابطه تجربی به دست آمده از دقت بالایی برخوردار میباشد. در شکل ۱۳ درصد خطای مدل های تحلیلی وودوارد، زئیرا، فعلی و فلورانس بهینه شده برای ضخامت مسلم ۵٫۵ mm



۵- نتیجهگیری

در مقاله حاضر به بررسی زاویه مخروط ناقص سرامیکی برحسب سرعت برخورد پرتابه سرمخروطی در اهداف سرامیک فلز پرداخته شده و یک رابطه تجربی برای زاویه مخروط سرامیک برحسب سرعت برخورد پرتابه برای اهداف متوسط سرامیک فلز ارائه شده است. همچنین آزمایشهای انجام شده، نشان دادند که یک مخروط دو مرحلهای صورت گرفته که مخروط اولیه دارای زاویه متغیر و مخروط ثانویه دارای زاویه ثابت در حدود ۲۳-۲۲ درجه می باشد.

- Lee, M. and Yoo, Y.H. "Analysis of Ceramic/Metal Armoursystems", Int. J. Impact Eng, Vol. 25, pp. 819-829, 2001.
- Florence, A.L. "Interaction of Projectiles and Composite Armor, Part II", Standfordresearch Institute, Menlo Park, California, AMMRC-CR-69-15, 1969.
- Woodward, R.L. "A Simple One-Dimentional Approach to Modeling Ceramic Compositarmour Defeat", Int. J. Impactengng, Vol. 9, pp. 455-474, 1990.
- 6. Den Reijer, P.C. "Impact on Ceramic Faced Armours", Phd Thesis, Delft University Oftechnology.
- Zaera, R. and Sanches-Galvez, V. "Analytical Modeling of Normal and Oblique Ballisticimpact on Ceramic/Metal Light Weight Armours", Int. J. Impact Engng, Vol. 21, No. 3, pp. 133-148,1998.
- Feli, S., Aalamiaaleagha, M.E., and Ahmadi, Z. "A New Analytical Model of Normal penetration of Projectiles into the Light-Weight Ceramic-Metal Target", Int. J. Impact Engng, Vol. 37, pp. 561-567, 2010.
- 9. Bless, S. J., Rozenberg, Z., and Yoon B. "Hypervelocity penetration of Ceramics", Int. J. Impact Eng, Vol. 5, pp.165-171,1987.
- Mayseless, M., Goldsmith, W., Virosterk, S.P., and Finnegans. A. "Impact on Ceramic Targets", J. Appl. Mech, Vol. 54, pp. 373-378, 1987.
- Fellows, N.A. and Andbartan, P.C. "Development of Impact Model for Ceramic Faced Semiin finitearmour", Int. J. Impact Engng, Vol. 22, pp. 793-811, 1998.
- Wilson, D. and Hetherington, J.G. "Analysis of Ballistic Impact on Ceramic Faced Armourusing High Speed Photography In: Proc. Lightweight Armour System Symp", Cranfield: Royal Military College of Sci., pp. 123–130, 1995.
- 13. Wilkins, ML. Cline, C.F., and Honodel, CA. "Forth Progress Report of the Light Armorprogram", Livermore, CA: Lawrence Livermore National Laboratory. Report No. UCRL-50694, 1969.

زاویه مخروط اولیه بهصورت دو تابع خطی و نمایی که در محدوده سرعت ۷۵۰ ۲۵۰ دارای هم پوشانی بالایی بوده، بیان شده است. روابط بهدست آمده با توجه به دو فرض: ۱- زاویه مخروط در سرعتهای بالاتر از ۱۰۰۰ ثابت است و ۲- زاویه مخروط در سرعتهای چند برابر سرعت حد بالستیک به صفر میل میکند، مورد بحث و بررسی قرار گرفته شده است. با منا قرار دادن فرض ۱، بهترین گزینه برای پیشبینی زاویه مخروط، رابطه خطی بوده و در صورتیکه فرض ۲ مبنا قرار گیرد، رابطه نمایی بهترین گزینه برای پیشبینی زاویه مخروط

با به کارگیری رابطه تجربی زاویه مخروطی در مدل تحلیلی فلورانس که سرعت حد باستیک را پیش بینی می نمایید، این مدل بهینه گردید به طوری که با مبنا قرار دادن نتایج ویلکینز، نتایج به دست آمده از مدل تحلیلی بهینه شده دارای خطای کمتر از ۱۲٪ گردید. نتایج به دست آمده دال بر اهمیت ارائه رابطه دقیق زاویه مخروطی و تأثیر آن در جواب نهایی دقیق در مدل های تحلیلی می باشد. مقایسه نتایج به دست آمده از آزمایش ها با نتایج تحلیلی سایر نویسندگان نشان داد که رابطه تجربی به دست آمده از اعتبار مناسب و بالایی بر خوردار است.

8- مراجع

- 1. Moshtaghian, M. and Vahedi, Kh. "Penetration Analysis of a Projectile into a Ceramic/Composite Armor", Aero. Mech.J. Vol. 6, pp. 81-94, 2010 (In Persian).
- Wilkins, M.L. "Mechanics of Penetration and Perforation", Int. Engngsci, Vol. 16, pp. 793-807, 1978.